

GREENSPAN 茎流法对玉米蒸腾规律的研究

刘德林, 刘贤赵  
(烟台师范大学地理与资源管理学院, 山东 烟台 264025)

**摘 要:** 以盆栽玉米为试材, 称重法为基准, 验证了 GREENSPAN 茎流法测量作物蒸腾量的可行性。茎流法与称重法两者测值的绝对误差为 0.20~4.56 g/(株·h), 相对误差为 2.03%~10.42%, 表明茎流计所测得的玉米茎流速率可准确的表示作物蒸腾速率。以此为基础, 探讨了不同天气下 GREENSPAN 茎流法实测玉米茎流的日变化规律: 白天玉米茎流随太阳辐射及天气变化呈规律性变化, 晚间有较细微而稳定的茎流。晴好天气, 玉米茎流的日变化呈单峰曲线, 多云或阴天天气, 为不对称的“M”型, 且茎流的启动时间存在一个受天气和太阳辐射变化共同影响的临界值。灰色关联度分析表明, 晴好天气下, 太阳辐射是影响蒸腾速率的主要因素; 多云或多云转晴天气下, 气温和相对湿度成为影响蒸腾速率的主要因素, 太阳辐射的作用相对降低。

**关键词:** 茎流计; 玉米; 蒸腾速率; 气象因子; 日变化

中图分类号: S513.061      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2006)02-0134-04

Study on Transpiration of Maize with Greenspan Stem Flow Gauge

LIU De-lin, LIU Xian-zhao  
(College of Geography and Resource Management, Yantai Normal University, Yantai 264025, China)

**Abstract:** The accuracy and the validation of maize transpiration measured with sap flow by GREENSPAN technique were evaluated through pot experiment and weighing method. The absolute and the relative errors of measured values by GREENSPAN technique were 0.20~4.56 g/h per plant and 2.03%~10.42% separately compared with values through weighing methods which showed that the transpiration measured with the Sap Flow can exactly express the transpiration of mazier. Based on this, the diurnal variation of sap flow under different weather conditions was studied which showed that the change of maize transpiration has strong correlation with solar radiation and different weather conditions in day time and there was steady and minuteness sap flow in night time. Daily variations of sap-flow showed single-peak curve in fine days and dissymmetrical “M” type in cloudy days, and there existed a start up time of sap flow which decided by the weather and solar radiation. The grey correlated analysis showed that the main meteorological factors affected on transpiration of maize were solar radiation in fine days. The air temperature and relative humidity were the main factors and the effects of solar radiation on transpiration reduced in cloudy days.

**Key words:** sap-flow gauge; maize; transpiration rate; weather factors; daily change

作物蒸腾速率的准确测定对于节水农业的研究和发展具有重要意义。然而, 作物蒸腾是一个复杂的生理过程, 它既受作物本身形态结构和生理状况的制约, 又受各种外界环境条件的影响, 要想准确测定较为困难。现有的实测农田水分消耗的方法诸如波文比—能量平衡法、廓线梯度法、能量平衡—空气动力学阻抗综合法等虽然都具有一定的物理基础, 但几乎又都带有某些局限性<sup>[1]</sup>; 空气动力学法、蒸渗仪法、涡度相关法以及目前较为先进的遥感方法等, 都只能测定蒸散总量, 而无法将蒸腾与蒸发二者分开; 彭曼—蒙特斯公式虽然能够分开计算蒸腾量, 但公式参数确定的经验性和大量气象数据资料的测定导致了该方法所作作物蒸腾的不精确性, 且不能计算作物蒸腾的日变化过程。此外, 上述方法的技术原理各不相同, 实际操作起来十分麻烦, 测值大小各异, 数据的使用价值与测定经费差别也很大, 在使用上存在明显的不足, 要么是测定结果受人为干扰太大, 要么就是太费时费力,

无法在实际研究工作中采用。

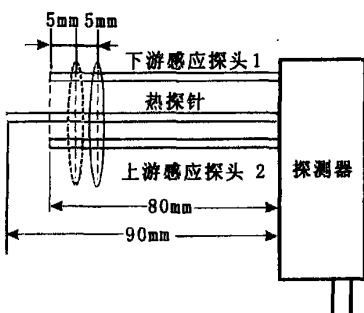


图1 GREENSPAN 茎流探测器

随着热脉冲技术和茎热平衡理论设计的商品化茎流计的问世, 为作物蒸腾速率的准确测定和节水农业方面的研究工作的广泛开展提供了技术保障<sup>[2]</sup>, 该方法以其不需要标定、不

① 收稿日期: 2005-05-08  
基金项目: 山东省教委项目(J02L01)资助  
作者简介: 刘德林(1979-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土资源高效利用方面的研究工作。  
© 2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

伤害植株<sup>[3]</sup>,并能在田间对一个植株进行长时间定点测定,测定参数少,易于野外操作及远程下载数据等优点,受到国内外学者广泛关注。目前该方法已广泛的用于树冠蒸腾耗水量的研究<sup>[4~7]</sup>,但用于作物蒸腾方面的研究报道很少。本文以盆栽玉米为试材、称重法为基准,验证了 GREENSPAN 茎流法在测量作物蒸腾方面的可行性。并利用茎流计监测玉米植株的茎流变化规律,结合同步所测气象数据,用灰色关联度分析法分析了不同气象因子对蒸腾速率的影响。以期在这方面研究工作的广泛开展提供技术保障和理论支持。

### 1 茎流计基本原理

该方法由 Huber 先生 1932 年首次提出,Edward 将 Huber 的热脉冲补偿系统、Marshall 的流速流量转换分析及 Swanson 的损伤分析综合起来,形成系统的理论技术<sup>[8]</sup>,Olbrich 将其进一步完善<sup>[9]</sup>,并开始在植物水分问题研究中使用。其物理组成如图 1:茎流传感器使用两个探测器,每个探测器上具有一个热探针和两个感应探头,上游感应探头位于热探针下方 5 mm 处,下游感应探头位于热探针下方 10 mm 处。每个感应探头上都有 1 或 2 个热敏电阻(传感器),第一个热敏电阻位于距感应探头尖端 5 mm 处,第二个热敏电阻位于第一个热敏电阻后方 5 mm 处,热敏电阻在垂直平面上是成对的,从而使得茎流速率的测量更为容易。其理论基础是:作物在蒸腾过程中,根系从土壤中吸收的水分通过茎秆源源不断地输送至叶片,并通过叶气孔散发到大气中去,在此过程中,作物茎秆中的液体一直处于流动状态。当作物茎内的液流在某一点被注入热脉冲后,茎秆液流携带的能量被分为四部分,一部分随茎内水分向上运动而向上传输( $Q_r$ ),一部分与上、下部的水体发生热交换( $Q_v$ ),一部分以辐射的形式向周围散发( $Q_s$ ),还有一部分以能量的形式储存在所测植株的茎秆内( $Q_i$ )。根据注入作物茎内热脉冲向上传输的速率以及与周边水流的热交换程度,由热传输理论和茎热平衡理论通过一定的数学计算求得茎秆的水流通量(即植株蒸腾速率)。在试验中由于玉米的茎秆较细,故储存热量可以忽略不计,茎热平衡方程为

$$P_{in}=Q_r+Q_v+Q_f \tag{1}$$

式中,  $P_{in}$ ——热源恒定功率。其中  $Q_r$  和  $Q_v$  分别由下式计算

$$\begin{cases} Q_r=k_{sh}\cdot C_h \\ Q_v=k_{st}\cdot A\cdot d_{Tu}/d_x+k_{st}\cdot A\cdot d_{Td}/d_x \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $C_h$ 、 $k_{sh}$ ——辐射热电堆的电压(mV)和探头热导常数;  
 $k_{st}$ ——茎秆热传导率[W/(m·K)]; $A$ ——茎秆截面积(m<sup>2</sup>);  
 $d_{Tu}/d_x$ 和  $d_{Td}/d_x$ ——向上和向下传导的温度梯度(1/m)。根据(1)、(2)式和能量平衡方程,可得到计算茎流量的公式:

$$F=P[P_{in}-k_s\cdot A\cdot (d_{Tu}/d_x+d_{Td}/d_x-k_{sh}\cdot C_h)]/(C_p\cdot d_r) \tag{3}$$

式中:  $F$ ——茎流量; $C_p$ ——水的比热容[J/(g·°C)];  
 $d_r$ ——两测点间液流温度变化,其他参数同上。

### 2 材料与方法

#### 2.1 试验材料

选取夏玉米(掖单 302)为试验材料,于 2004 年 5 月底种植在直径 18 cm、高 21 cm 的塑料盆中。使用校园外容重为 1.34 g/cm<sup>3</sup>、田间持水量为 28.54% 的中壤质土(土壤有机质含量为 14.23 mg/kg,速效 P、碱解 N 和全 N 分别为 11.42 mg/kg、24.47 mg/kg 和 1.09 mg/kg)加 1/3 容积腐熟的厩肥过筛、装盆,每盆种植 1 株。植株茎流观测期间,土壤供水充足,土壤含水量控制在田间持水量的 85% 以上,同时用 0.

1 mm 的地膜严密覆盖土面,防止土层蒸发。

#### 2.2 试验方法与数据采集

使用称量 15 kg、感量 1 g 的电子台称,于试验期间每天 6:00 到 20:00 每隔 30 min 进行快速称重,前后两次称重的改变量即为作物的蒸腾量。由于该方法简便易行,计量精确,在对比研究中可作为同步比较的基准;GREENSPAN 茎流法是在玉米茎秆距土面第 2 个节点处安装两个探测器,植株伤口处用纸质防水胶带围贴,并用围尺测量玉米基部茎粗。测定期间,玉米茎粗为 5.92~6.03 cm。试验结束后,用锉子锉取热脉冲引起的植株茎部损伤部分,测定伤口大小。数据采集时间间隔为 30 min,所得数据通过 GREENSPAN 分割茎流数据软件 SAPPRO 和茎流数据分析软件 SAPCAL 对测定数据进行自动处理得到取样时间、茎干液流速度(g/h)、平均茎液流动速度(cm/h),4 种深度(4 探头)的液流速度(cm/h)和累积茎干液流量(g)等系列数据,同时,用澳大利亚产的 Monitor 移动式自动气象站同步测定太阳辐射、气温、相对湿度等气象因子;用三杯风速仪测定玉米冠层顶端风速。

### 3 结果与分析

#### 3.1 精度及统计分析

从表 1 可以看出在整个茎流计观测期间,用称重法和用茎流计测算结果二者最大相差 12.76%(7 月 17 日),最小相差 1.14%(7 月 18 日),二者平均相差 6.33%。以 7 月 18 日为例,6:00~20:00 用茎流法测得耗水量为 557.80 g/株,而同期称重法测量为 551.30 g/株,两者相差 6.50 g/株,相对误差仅为 1.14%。比较不同时间两种方法的测值(表 2)可以看出,两者日变化规律相似,绝对误差和相对误差分别为 0.20~4.56 g/(株·h)和 2.03%~10.42%,平均绝对误差和平均相对误差分别为 2.03 g/(株·h)和 5.68%;对两者的回归及相关分析表明,两者呈极显著线性相关,关系式为  $SP=1.034Q_w$ ( $SP$  为茎流法测值, $Q_w$  为称重法测值), $R^2$  系数高达 0.987 1。表明茎流计所测植株的茎流速率可准确的表示作物蒸腾速率,从而为大田作物蒸腾量的测定提供了一种新的技术方法。

表 1 茎流法与称重法测算蒸腾量结果比较

天气情况	日期	茎流法测值 $I/(g\cdot h^{-1})$	称重法测值 $I/(g\cdot h^{-1})$	绝对误差 $I/(g\cdot h^{-1})$	相对误差/%
晴天	7 月 14 日	49.75	52.32	2.57	4.91
多云转晴	7 月 15 日	43.48	47.74	4.26	8.92
晴间多云	7 月 16 日	44.46	48.58	4.12	8.48
晴天	7 月 17 日	51.08	45.30	5.78	12.76
晴间多云	7 月 18 日	37.17	36.75	0.42	1.14
晴天	7 月 19 日	52.19	51.57	0.62	1.20
阴天	7 月 20 日	21.88	25.02	3.14	1.255
晴间多云	7 月 21 日	22.57	23.98	1.14	5.88

表中数据为测定期间 6:00~20:00 的平均值。

#### 3.2 玉米茎流的变化规律

茎流计一个最大的特点就是可以对植株进行长时间定点测定,实时监测植物茎秆液流量的变化,利用茎流计这一特点可以研究作物蒸腾的变化规律。从 7 月初开始,随机选取试验中长势良好的一株玉米进行长期跟踪观测(图 2)表明,玉米的茎流速率有明显的日变化规律。晴好天气(图 2a)条件下,玉米茎流的日变化规律呈单峰曲线,大约从夜间 21:30 到次日凌晨 6:00 有较为稳定而微小的茎流。凌晨 6:00 植株茎流开始启动,随太阳辐射的增强和气温的升高,植

株的茎流速率迅速增大,在 12:00 左右达到一天中的峰值,随后略有下降,在 13:00 太阳辐射最强时出现一个低谷,在 14:00 左右时又出现一次峰值,之后随着太阳辐射的减少而急剧下降,21:30 左右接近零值。在一天中太阳辐射最强的时候,植株茎流反而有所下降,其原因一方面可能是随着作物蒸腾的进行,土壤含水量下降,导致气孔开度减小,另一方面可能是由于叶面温度过高,呼吸作用加强,光合受抑,致使

细胞间 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致气孔开度减小。在晴间多云(图 2b)天气条件下,玉米茎流呈不对称的“M”型,大约从凌晨 3:00 左右开始启动,变化缓慢且较为稳定,到 13:00 左右达到峰值,然后减小,在 21:00 之后仍有较小的茎流。从凌晨 6:00~20:00,由于太阳辐射的不稳定变化,使茎流的变化也极其不稳定,但它依然随着太阳辐射的变化而呈现规律性变化,表明太阳辐射是影响玉米茎流的主要因子。

表 2 2004 年 7 月 18 日茎流法与称重法蒸腾测值比较

时间	茎流法/ (g·h <sup>-1</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	称重法/ (g·h <sup>-1</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	绝对误差/ (g·h <sup>-1</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	相对误差/ 差/%	时间/h	茎流法/ (g·h <sup>-1</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	称重法/ (g·h <sup>-1</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	绝对误差/ (g·h <sup>-1</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	相对误差/ 差/%
6:00	19.02	18.50	0.52	2.81	14:00	84.44	82.50	1.94	2.35
7:00	29.98	28.42	1.56	5.49	15:00	36.08	39.36	3.28	8.33
8:00	24.80	22.46	2.34	10.42	16:00	71.08	66.52	4.56	6.86
9:00	37.08	39.74	2.66	6.69	17:00	41.18	40.06	1.12	2.80
10:00	41.56	42.42	0.86	2.03	18:00	18.54	20.04	1.50	7.49
11:00	40.16	38.56	1.60	4.15	19:00	16.64	15.54	1.10	7.08
12:00	36.08	39.72	3.64	9.16	20:00	8.42	8.22	0.20	2.43
13:00	52.74	49.24	3.5	7.11					

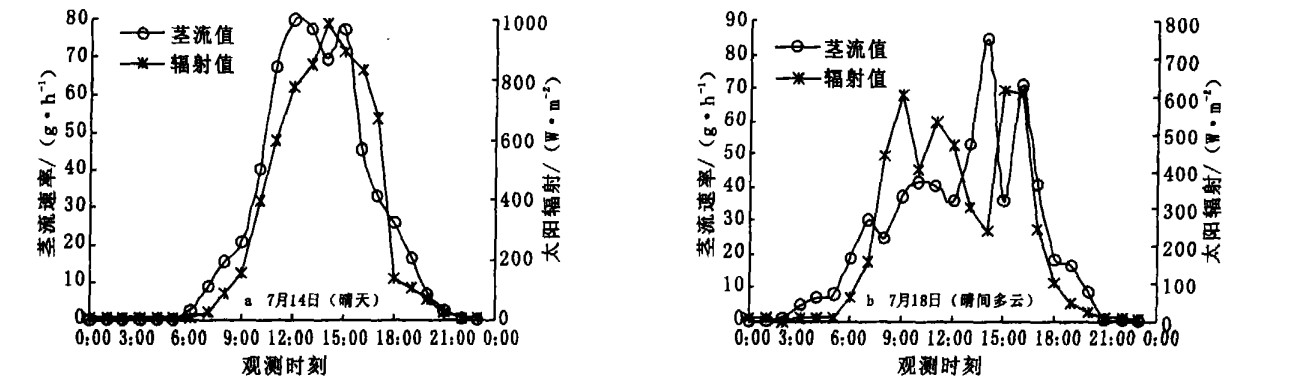


图 2 玉米茎流速率的日变化

3.3 气象因子对玉米茎流日变化的影响

灰色关联分析是一种相对性排序分析。主要用于分析系统内诸因素之间随时间变化的动态关系及其特征,分析哪些因素关系密切,哪些因素不够密切,从而找到系统内的主要矛盾和主要特征<sup>[10]</sup>。本文采用 DPS(v3.01 专业版) 数据处理系统对所测同步气象数据(图 3)进行处理,以蒸腾速率为母序列,取灰数 *k* 的白化值为 0.5, min = 0 进行均值化无量纲处理,计算得各关联序和关联系数(表 3)。由表 3 可以看出,不同天气条件下,相同气象因子对玉米蒸腾速率的影响程度不同。晴好天气(7 月 14 日)和晴间多云(7 月 16 日)天气条件下,影响玉米单叶蒸腾速率的气象诸因子中太阳辐射起主导作用,气温和相对湿度作用相对较弱,风速对蒸腾的影响较小;多云转晴(7 月 15 日)和阴天(7 月 20 日)条件下,气温和相对湿度成为影响蒸腾速率的主要因子,太阳辐射作用相对降

低,风速对蒸腾的影响较小。对蒸腾速率与太阳辐射、气温和相对湿度的相关分析表明:太阳辐射和气温与蒸腾速率之间为正相关关系,相对湿度和蒸腾速率之间为负相关关系。

表 3 茎流速率和主要气象因子关联序和关联系数

日期	天气状况	关联序	关联系数
7 月 14 日	晴天	$X_2 > X_1 > X_3 > X_4$	$G(1, 1) = 0.66744$
			$G(1, 2) = 0.75945$
7 月 15 日	多云转晴	$X_1 > X_4 > X_2 > X_3$	$G(1, 3) = 0.61878$
			$G(1, 4) = 0.61405$
7 月 16 日	晴间多云	$X_2 > X_1 > X_4 > X_3$	$G(2, 1) = 0.80063$
			$G(2, 2) = 0.77507$
7 月 20 日	阴天	$X_1 > X_4 > X_2 > X_3$	$G(2, 3) = 0.63971$
			$G(2, 4) = 0.79641$
7 月 14 日	晴天	$X_2 > X_1 > X_4 > X_3$	$G(3, 1) = 0.71977$
			$G(3, 2) = 0.79577$
7 月 15 日	多云转晴	$X_1 > X_4 > X_2 > X_3$	$G(3, 3) = 0.59444$
			$G(3, 4) = 0.66354$
7 月 16 日	晴间多云	$X_2 > X_1 > X_4 > X_3$	$G(4, 1) = 0.81508$
			$G(4, 2) = 0.77572$
7 月 20 日	阴天	$X_1 > X_4 > X_2 > X_3$	$G(4, 3) = 0.65168$
			$G(4, 4) = 0.80354$

表中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  分别代表气温、太阳辐射、风速和相对湿度。

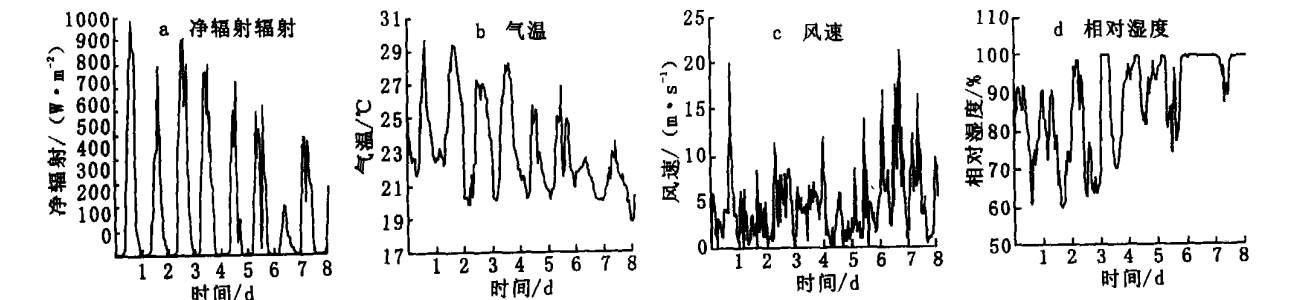


图 3 观测期间(2004 年 7 月 14 日~17 月 21 日)主要气象因子

4 结 论

(1) 基于对称重法和茎流法测算玉米蒸腾速率结果的分析表明,用 GREENSPAN 茎流法测量作物的蒸腾量是可行的,两者测值的绝对误差和相对误差分别为 0.20 ~ 4.56 g/(株·h)和 2.03% ~ 10.42%,证明 GREENSPAN 茎流法所测的作物蒸腾速率的精度是可靠的。

(2) GREENSPAN 茎流法能够较灵敏且较准确地反映参考文献:

[1] 孙卫国,申双和. 农田蒸散量计算方法的比较研究[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(1): 101– 105.  
[2] 段爱旺. 一种可以直接测定蒸腾速率的仪器—茎流计[J]. 灌溉排水, 1995, 14(3): 44– 47.  
[3] F P Weibeland, Jade Vos. Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method [J]. Plant and Soil. 1994, 166: 203– 219.  
[4] 刘奉觉,等. 用热脉冲速度仪(HPVR)测定树干液流[J]. 植物生理学通讯, 1993, 29(2): 110– 115.  
[5] 张宁南,徐大平, Morris J. 雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(6): 661– 667.  
[6] 王得祥,康博文,姜海龙,赵生惠. 陕北黄土丘陵区主要成林树种耗水量研究[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(3): 1– 3.  
[7] 李海涛,陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(1): 1– 6.  
[8] Edwards W R N, N W M Warwick. Transpiration from a kiwi fruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman– Monteith equation [J]. N. Z. J. Agric. Res. 1984, 27: 537– 543.  
[9] Olbrich BW. The verification of the heat pulse velocity technique for estimating sap flow in Eucalyptus grandis [J]. Can J. For. 1991, 21: 836– 841.  
[10] 张继祥,等. 枣麦复合栽培系统中小麦光合速率与气候生态因素的灰色关联分析[J]. 山东气象, 1997, 17(2): 8– 11.

(上接第 101 页)

溉的用水模式,通过重新调整使 8.74% 的灌溉面积的水资源利用系数由 0.43 提高到 0.65,有效利用率大大提高;雨养型旱作农业丰产补灌的用水模式,利用城郊地下水资源较丰富可进行提灌的有利条件,在干旱时进行旱作农业丰产设

施节水补充灌溉,使旱地作物实现了丰产、优质;总之,各种模式有效地解决了平凉城郊水资源开发利用中存在的突出问题,是雨养型农业区水资源战略性调整和可持续利用的发展方向,可值得大力推广应用。

参考文献:

[1] 雷敏,等. 西北城市水资源利用的问题诊断与应对措施[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 26– 28.  
[2] 赵秉栋,等. 黄河流域水资源可持续利用研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 102– 106.  
[3] 任焯,等. 构建黄土高原地区水土资源可持续开发与利用三结构模式[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 46– 50.  
[4] 宋新山,等. 我国西部地区水资源环境问题及其可持续对策[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 60.  
[5] 白军红,等. 中国水资源可持续开发利用模型及对策[J]. 水土保持通报, 2000, 20(3): 38– 42.  
[6] 姜文来. 水资源价值论[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 185– 189.  
[7] 中国科学院地学部. 中国水问题出路[J]. 地球科学进展, 1998, (4): 33– 54.  
[8] 陈家琦,等. 水资源学概论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 64– 79.  
[9] 令福定,等. 甘肃省平凉地区水资源调查评价与利用区划[R]. 1987. 87– 98.  
[10] 张正栋. 中国西北地区水资源利用的对策研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 308– 312.

(上接第 107 页)

参考文献:

[1] Willian F Schilinger. Deep ripping fall– planted wheat after fallow to improve infiltration and reduce erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 53(3): 198– 202.  
[2] 哈斯,陈渭南. 耕作方式对土壤风蚀的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 11– 18.  
[3] 胡兴波,曹敏建. 不同耕作措施对土壤含水量及玉米出苗率的影响[J]. 玉米科学, 2003, 11(3): 60– 62.  
[4] 陈君达,王兴文,李洪文. 旱作农业保护性耕作体系与免耕播种技术[J]. 北京农业工程大学学报, 1993, 13(1): 27– 33.

(上接第 133 页)

[2] 唐邦兴,柳素清. 四川省阿坝藏羌自治州泥石流及其防治研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993. 131– 132, 134– 135.  
[3] 四川省地质矿产勘查开发局,成都水文地质工程地质队. 四川省金川县地质灾害防治规划报告[R]. 2003. 2– 3.  
[4] 四川省地质矿产勘查开发局,成都水文地质工程地质队. 四川省地质灾害调查与区划报告[R]. 2003. 56– 57.  
[5] 阿坝州国土资源局. 四川省阿坝藏羌自治州地质灾害防治立项申报书[R]. 2004. 31– 32.